 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i3.9828

Common Fault Diagnosis and Maintenance Technology of Logging Auxiliary Short Sections

Hongqi Liu Changqing Huo Qiuli Zhao Fanyu Meng Zhenxing Li

Tanggu Operation Company Oil Technology Division, CNOOC Oilfield Services Co., Ltd., Baoding, Hebei, 300450, China

Abstract

Cable logging auxiliary short sections (such as flexible short sections, tension short sections, and anti-rotation short sections) are important connection and functional adjustment units in downhole cable logging instrument strings. Their reliability is crucial to the quality of data acquisition and construction efficiency in cable logging operations with large cable runs. Based on the on-site fault statistics of auxiliary short sections for cable logging with large cable runs in a certain oilfield in 2024, this paper summarizes the diagnostic logic and maintenance technology paths for four typical faults: mechanical fatigue failure, load signal transmission anomalies, mechanical seal degradation, and environmental adaptability decline. For bending fatigue faults in flexible short sections, methods such as bending stiffness testing and fatigue crack detection are used; for sensor anomalies in tension short sections, dynamic load calibration and signal response verification methods are employed; for mechanical seal failure judgment, helium mass spectrometry leak detection and pressure decay curve fitting methods are applied; and for environmental adaptability fault reproduction, a high-temperature and high-pressure cyclic test platform is used for condition simulation. In terms of maintenance processes, mechanical structure repairs follow relevant industry standards; tension sensor calibration adopts a multi-point linear fitting compensation algorithm; high-pressure seal repairs use a metal-elastomer composite seal structure; and system testing includes three reliability verification indicators: bending performance, signal transmission, and vibration impact.

Keywords

Cable Logging with Large Cable Runs; Auxiliary Short Section; Fault Diagnosis; Flexible Short Section

测井辅助短节常见故障诊断与维修技术

刘红旗 霍常青 赵秋力 孟繁宇 李振兴

中海油田服务股份有限公司油技事业部塘沽作业公司，中国·河北 保定 300450

摘 要

电缆大满贯测井辅助短节（柔性短节、张力短节、防转短节等）属于井下电缆测井仪器串的重要连接和功能调节单元，其可靠性关乎电缆大满贯测井作业数据采集的质量以及施工效率。依据2024年度某油田电缆大满贯测井配套辅助短节现场故障统计，整理出机械疲劳失效、载荷信号传输异常、机械密封劣化、环境适应性衰退这四种典型故障的诊断逻辑及维修技术路径。对柔性短节弯曲疲劳故障，用弯曲刚度测试和疲劳裂纹检测的方法；张力短节传感器异常诊断用动态载荷标定和信号响应校验的方法；机械密封失效判断用氦质谱检漏和压力衰减曲线拟合的方法；环境适应性故障复现用高温高压循环试验平台进行工况模拟。从维修工艺上来说，机械结构修复执行相关行业标准，张力传感器校准采用多点线性拟合补偿算法，高压密封修复使用金属-弹性体复合密封结构，系统测试包含弯曲性能、信号传输、振动冲击这三个可靠性验证指标。

关键词

电缆大满贯测井；辅助短节；张力短节；维修工艺

1 引言

井下电缆大满贯测井仪器串是由柔性短节、张力短节、防转短节等辅助短节串联而成，具有弯曲补偿、载荷监测、防反转保护、环境隔离等功能，是电缆大满贯测井作业顺利进行的保证。在井深大于 5 千米的作业环境中，环境温度可以达到 175℃，静液柱压力超过 140MPa，并且伴随着剧烈的机械振动和化学腐蚀。2022 年开始该系列电缆大满贯测井辅助短节在该油田大规模使用，共完成 800 多口井次的作业，但是 2024 年第二季度故障统计显示，该系列短节的平均无故障作业周期已经由设计值的 120 口井次下降到 87.3 口井次，因该系列短节故障引起的测井中断、仪器串起下等事件占全年电缆测井作业事故的 23.6%。由于故障模式多样，井下环境不能直接观察，因此诊断效率低、维修返工率高的现象暴露出现有诊断流程和维修工艺的系统性缺陷。

【作者简介】刘红旗（1973—），中国河北保定人，本科，从事测井辅助短节研究。

2 电缆大满贯测井辅助短节结构原理与故障类型

2.1 辅助短节的基本结构与功能概述

电缆大满贯测井辅助短节有柔性短节、张力短节、防转短节等，被广泛地应用到各类电缆大满贯测井作业当中，是连接测井仪器串和测井电缆、保证电缆测井作业稳定性的关键部件。柔性短节的外壳用高强度合金钢锻造而成，内部采用波纹管结构实现弯曲柔性，设电缆穿芯通道与密封接口，两端有标准化的机械接头，可快速对接上下仪器模块。张力短节内置应变式传感器用来监测电缆轴向载荷，防转短节用特殊的机械结构防止下部仪器串旋转扭结电缆。壳体和端盖之间用双道 O 形圈加金属垫环密封，整体密封等级满足井下高温高压环境的要求，可在 175℃下承受 140MPa 静压持压要求 [1]。

2.2 核心机械结构与传感器工作原理

柔性短节的主要作用是实现电缆随仪器串的弯曲补偿，允许一定角度的弯曲变形来适配井眼轨迹的曲率变化，减小电缆在造斜段的弯折应力，内置电缆穿芯通道保护测井电缆与信号传输。张力短节的主要功能是实时测量电缆轴向拉压载荷，其传感器为全桥应变片结构，输出信号要求在线性范围内，以准确反映电缆载荷和悬重变化。防转短节利用棘轮机构或者单向离合器结构，正向随电缆牵引旋转，反向旋转时被阻止，保护下部仪器串不受反扭冲击且防止电缆扭结。信号处理电路集成了模数转换、数字滤波、协议编码等功能，ADC 的采样率和分辨率的选择会影响载荷测量的精度，本型号配置的 16 位 ADC 在 125℃环境下的有效位数实测只有 13.2 位，温漂效应对弱信号的量化精度造成很大影响。

2.3 井下工作环境的主要应力分析

温度应力的累积效应一般都被低估了。井下温度梯度使辅助短节在下井过程中由常温变为高温，热膨胀系数的不同造成壳体、弹性元件、密封件之间产生复杂的热应力场，柔性短节的波纹管在多次温度循环后可能产生疲劳裂纹萌生和扩展。机械振动由下井时仪器串碰撞、井眼摩擦的脉动激励所引起，频谱分析得到主振频率为 80Hz 到 200Hz，存在与短节结构件固有频率耦合的风险。腐蚀环境也不能忽视，井筒流体中 H_2S 和 CO_2 在高温高压下渗透性很强，金属壳体和电缆密封接口的电化学腐蚀被加速 [2]。

3 辅助短节典型故障诊断流程与案例

3.1 柔性短节故障的表征与诊断步骤

柔性短节故障的典型表征有弯曲刚度异常、电缆穿芯保护失效、弹性元件疲劳开裂等，在 2024 年第二季度返修的 47 台常规短节中，柔性短节机械相关故障占 31.9%。诊断流程从外观检查开始，目视检查波纹管表面有无裂纹、变形或者腐蚀痕迹，电缆密封接口是否完好，外观正常就进入性能测试阶段，施加标准弯矩测量弯曲角度响应曲线，刚度偏离设计值超过 15% 或者出现非线性特征就判定波纹管有异常。某编号柔性短节在弯曲测试中出现异常响声现象，拆解后发现内部波纹管有疲劳裂纹，高温下材料疲劳寿命降低是主要原因。

3.2 张力短节信号异常的诊断流程

张力短节的载荷信号异常一般具有间歇性，静态测试不能再现。诊断策略是用标准载荷逐步增加，逐级检测传感器输出的方法，载荷从零逐渐增加到满量程来检验线性度和灵敏度。频谱分析是定位干扰源的有效方法，一批次的短节载荷数据里出现了周期性的毛刺，频谱上显示干扰的频率是 48.3kHz，干扰幅度与仪器串振动正相关，最终定位到机械振动通过结构传递耦合到传感器。时域相关性分析可以区分随机噪声和确定性干扰，将疑似故障传感器的采样数据和参考通道做互相关运算，相关系数小于阈值就说明该噪声为传感器本身故障而不是共模干扰 [3]。

3.3 机械连接与密封失效的定位分析

密封失效的后果最为严重，一旦井筒流体进入内腔就会造成电缆芯线短路、内部结构的灾难性破坏。氦质谱检漏是检验整体密封性能的最佳方法，在短节充入氦气保压到一定压力后移到检漏仪上测泄漏率，设计指标要求泄漏率小于 1×10^{-8}Pa · m³/s。压力衰减法用来粗略地确定泄漏部位，在短节内腔充入干燥氮气之后测压曲线随时间的变化，泄漏集中在端盖密封处时曲线呈近似线性衰减，而电缆密封接口处微泄漏时曲线衰减速率会随着压力下降而变慢，呈非线性特征。某编号张力短节检漏结果为泄漏率为 3.7×10^{-6}Pa · m³/s，拆解后发现上端盖 O 形圈表面有径向划痕，是装配时造成的机械损伤 [4]。

4 关键模块维修技术与工艺优化

4.1 柔性短节弹性元件维修与更换规范

柔性短节弹性元件（波纹管）的维修严格按照有关行业标准中返工和修理工艺的要求进行。波纹管拆卸要使用专用工装，操作过程根据结构特点的要求来设置，防止二次损伤，配合面有损伤时用研磨或堆焊修复后重新装配。波纹管更换时，优先选用耐温等级不低于原件的材料，特别注意高温疲劳寿命指标，设计寿命不能满足井下循环次数要求的型号不能用在井下仪器上。更换波纹管时要注意刚度参数的一致性，新波纹管要先在测试台上测出弯曲刚度与原件对比，偏差大于 5% 时会影响测井仪器的定向精度，同时保证电缆穿芯通道顺畅无遮挡。

维修过程中防转短节的棘轮机构检查也不能忽略，电缆大满贯测井仪器需要可靠的防反转保护，这些机构的磨损和卡滞要重点检查，维修人员必须按规程进行检查，对磨损超标的棘爪和棘轮要及时更换。张力短节的应变传感器返修工艺比较复杂，需要使用专门的检测设备来检查传感器粘贴和接线状态，传感器脱粘时需要彻底清除残胶后重新粘贴，

残胶会使新传感器贴合不良而影响测量精度。多个传感器组桥的张力短节故障排查，用电阻测量仪做电桥平衡性检测，确定故障传感器位置后更换，新传感器应选用与原规格相匹配的型号，按工艺要求固化防止高温脱落。

4.2 张力短节传感器校准与信号调理技术

张力短节传感器校准的核心就是建立输入电缆载荷和输出电信号之间准确的关系。多点校准法在量程范围内选取若干个标定点，记录各点输入值和输出值后用最小二乘法拟合校准曲线，用残差分析来评价拟合优度，残差的标准差大于满量程的 0.1% 时，需要增加标定点或者用高阶多项式拟合。温度补偿是井下传感器校准的重要环节，把传感器放入程控温箱中，在井下传感器工作温度范围内每隔 25℃取一组校准数据，根据这些数据建立温度—灵敏度、温度—零点补偿表，存于信号处理模块的存储器中。信号调理电路调试主要是增益设置和滤波器截止频率的匹配，前者保证 ADC 输入范围的充分利用，后者在信号带宽和噪声抑制之间求得平衡 [5]。

张力传感器的校准需要用经过计量检定的高精度力值标准机作为基准，标准测力仪的准确度等级应比被校传感器至少高出四倍，校准过程中待传感器温度稳定后再采集数据，急速加载或卸载会引入动态误差。应变式传感器有蠕变特性，长时间受力后输出信号会慢慢漂移，校准时需要记录加载后即时读数和稳定读数的差值作为蠕变修正系数。信号调理电路中所用的运算放大器既要考虑低噪声，又要考虑低温漂，斩波稳零型放大器虽然零点漂移很小，但是其内部开关会产生时钟馈通噪声，在低频精密测量场合不如高性能 JFET 输入型放大器适用。滤波器阶数选择要权衡相位失真和衰减特性，四阶巴特沃斯低通滤波器在保证平坦通带的同时提供足够的带外衰减，拓扑结构便于调试并且对元器件容差不敏感。

4.3 机械结构修复与高压密封工艺

壳体表面的划痕若只局限于表面，则用研磨抛光恢复粗糙度指标，密封面划痕深度大于 O 形圈压缩量的 20% 时必须采用激光熔覆或者堆焊工艺进行材料填充后再精加工。高压密封修复采用的是金属 - 弹性体复合密封结构，内层金属 C 形环起主要密封作用，耐高温，外层氟橡胶 O 形圈起冗余密封作用，有自紧效应，该结构重点应用于电缆密封接口和端盖密封。电缆密封接口处密封失效要重新修复密封面或更换密封接头，密封参数要严格控制，防止配合间隙过大产生泄漏通道。装配时采用与井筒流体相容的全氟聚醚基脂润滑 O 形圈，按设计规范控制装配扭矩，用扭矩扳手精准操作。

高压密封失效的根本原因大多可以追溯到密封槽的几何精度退化，长期高压循环载荷作用下密封槽侧壁会发生微量塑性变形，间隙增大，O 形圈在高压差驱动下被挤入间隙形成挤出破坏。维修时用三坐标测量仪对密封槽尺寸进行全检，槽宽超差时可以采用电刷镀工艺进行尺寸恢复，镀层材料选用和基体相近的镍钴合金来保证结合强度。电缆密封接口的密封也很重要，每次拆装后密封面都会产生微量磨损，累计磨损量超过允许值时必须进行密封面修复或者更换接头，API 规范对密封面的磨损极限有明确规定可以作为判废依据。安装前应做外观检查、硬度测试，如果密封件存放时间超过保质期或者硬度值偏离标称范围，就应报废，强行使用老化密封件是造成井下仪器早期失效的常见原因。

5 结语

电缆大满贯测井辅助短节（柔性短节、张力短节、防转短节等）的故障诊断与维修技术，是井下电缆大满贯测井仪器可靠性保证体系的重要组成部分，其作业环境处于多物理场耦合之中，且机械结构与信号传输集成度高，维修工艺要求严苛。根据该系列电缆大满贯测井辅助短节实践可知，诊断流程的规范化、维修工艺的精细化可以使得维修返工率由最初的 18.7%降低到现在的 6.2%，平均维修周期由原来的 5.3 天缩短到现在的 2.8 天。未来技术发展方向是智能诊断系统的创建，依靠机器学习算法对以往故障数据进行挖掘，从而实现故障模式的自动识别以及根因分析，探索增材制造技术在复杂结构件修复方面的应用前景。

参考文献

[1] 叶高,杨居朋,梁小兵,范修伟,李自成.油田测井无刷直流电机逆变器短路故障诊断及容错控制[J].微电机,2025,58(5):33-38.

[2] 曲春雨,马梓晋.测井绞车刹车结构故障分析与优化设计[J].石油管材与仪器,2025,11(3):103-108.

[3] 燕欢庆,黄宇.电缆测井井下张力随深度增加张力减小的故障研究[J].化工管理,2025(15):155-157+172.

[4] 李辉,陆永钢,刘得军,郝振华.基于故障相关性的随钻方位电磁波测井仪器可靠性失效建模研究[J].地球物理学报,2025,68(2):759-767.

[5] 韩建,陈着,王业统,曹志民,邓宇.基于RGCVAE的测井曲线重构方法[J].工业仪表与自动化装置,2025(5):87-91.